DOI: 10.22059/ijswr.2020.305420.668660 تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۱، شماره ۱۲، اسفند ماه ۱۳۹۹ (ص ۳۱۷۶-۳۱۶۱)

Assessment of Soil Quality in Paddy Soils with Different Yields (A Case Study: Kouchsfahan, Guilan Province)

MARYAM SHAKOURI KATIGARI[1], MAHMOOD SHABANPOUR[1*], NASER DAVATGAR[2], MAJID VAZIFEH DOOST[3]

1. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Guilan, Rasht, Iran.
2. Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.
3. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Guilan, Rasht, Iran.

(Received: June. 30, 2020- Revised: Aug. 10, 2020- Accepted: Nov. 15, 2020)

ABSTRACT

Rapid growth of population, followed by increasing food demand, necessitates knowledge of the relationship between yield and soil conditions. The soil quality index (SQI) is one of the indicators showing the soil conditions and the related properties very well. This study was performed to determine the effect of soil quality on rice yield in north of Iran (Gilan province). 64 soil samples from rice fields were prepared to measure the physical and chemical properties affecting soil quality and also the yield of rice in the mentioned fields were determined using plot. Then the total yields were divided into three classes with yields of less than 4000 kg/ha (first class), 4000-4500 kg/ha (second class) and more than 4500 kg/ha (third class). Among the studied properties, 16 properties as selected indicators of total data method (TDS) and five properties using principal component analysis as selected indicators of minimum data set method (MDS) were selected to determine the soil quality index. Fuzzy logic was used for scoring and the concept of communality index was used to weight the indicators and finally they were combined using weighted additive method. The results of quality index showed a positive and high correlation between TDS and MDS methods (R2 = 0.87). The results of correlation coefficient between yield and SQI by TDS method (R2 = 0.52) were higher than the SQI by MDS method (R2 = 0.28). In the MDS method, simmilar to TDS method, there was an increasing trend in the SQI value of higher yield classes, but there is no significant difference between the second and third classes. The difference between soil quality and lower yields with MDS method is significant, but this difference is not significant at higher yield levels, because as the number of indicators decreases, the accuracy and sensitivity of soil quality assessment decreases.

Keywords: Principal Component Analysis, Rice Fields, Soil Quality Index.

*Corresponding Author's Email: shabanpour@guilan.ac.ir

ارزیابی کیفیت خاک در خاک‌های شالیزاری با عملکردهای متفاوت (مطالعه موردی: کوچصفهان استان گیلان)

مریم شکوری کتیگری[۱]، محمود شعبانپور[۱*]، ناصر دواتگر[۲]، مجید وظیفه دوست[۳]

۱. گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

۲. موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

۳. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۴/۱۰- تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۵/۲۰- تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۸/۲۵)

چکیده

رشد سریع جمعیت و به‌دنبال آن افزایش نیاز غذایی، شناخت روابط عملکرد و شرایط خاک را ضروری می‌سازد. یکی از شاخص‌هایی که شرایط خاک و ویژگی‌های مربوط به آن را به خوبی نشان می‌دهد شاخص کیفیت خاک است. این پژوهش به‌منظور تعیین اثر کیفیت خاک بر عملکرد برنج در شمال ایران (استان گیلان) انجام گردید. ۶۴ نمونه خاک از مزارع برنج، برای اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی موثر برکیفیت خاک تهیه و همچنین عملکرد برنج نیز در مزارع مذکور با استفاده از پلات‌گذاری تعیین شد. سپس عملکرد کل منطقه به سه کلاس با عملکردهای کمتر از ۴۰۰۰ کیلوگرم بر هکتار (کلاس یک)، ۴۰۰۰ تا ۴۵۰۰ کیلوگرم بر هکتار (کلاس دوم) و بالاتر از ۴۵۰۰ کیلوگرم بر هکتار (کلاس سوم) تقسیم شد. برای تعیین شاخص کیفیت خاک از میان ویژگی‌های مطالعه شده ۱۶ ویژگی به‌عنوان شاخص‌های انتخابی روش کل داده‌ها (TDS) و پنج ویژگی با استفاده از تجزیه به مولفه‌های اصلی به عنوان شاخص‌های انتخابی روش مجموعه حداقل داده‌ها (MDS) انتخاب شد. از منطق فازی برای نمره‌دهی و مفهوم شاخص اشتراک برای وزن‌دهی شاخص‌ها استفاده و در نهایت تلفیق آنها با استفاده از روش افزایشی وزن‌دار انجام شد. بررسی نتایج شاخص کیفیت، همبستگی مثبت و بالا در دو روش TDS و MDS را نشان داد (R^2=0.87). نتایج ضریب همبستگی بین عملکرد و SQI به روش TDS (R^2=0.52) بالاتر از SQI به روش MDS (R^2=0.28) بود. در روش MDS نیز مانند روش TDSشاهد روند افزایشی در مقدار SQI کلاس‌های بالاتر عملکرد بوده، اما اختلاف معنی‌دار در بین کلاس دوم و سوم دیده نشد. تفاوت در بین کیفیت خاک با عملکردهای پایین‌تر با روش MDS معنی‌دار است اما این تفاوت در سطوح بالاتر عملکرد کمتر قابل تمیز می‌باشد، زیرا با کاهش تعداد شاخص‌ها دقت و حساسیت ارزیابی کیفیت خاک کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: تجزیه به مولفه‌های اصلی، مزارع برنج، شاخص کیفیت خاک.

مقدمه

خاک به عنوان شناخته‌شده‌ترین بستر رشد گیاه بوده و بسیاری از ویژگی‌های آن بر محصول گیاه تأثیر معنی‌دار داشته و تغییر در این خصوصیات تغییرپذیری عملکرد را در پی خواهد داشت (Bouman *et al*, 2006). هر چند رابطه بین عملکرد گیاه و خاک بسیار پیچیده است، اما عملکرد می‌تواند به‌عنوان معیاری برای ارزیابی خاک و کیفیت آن مورد استفاده قرار گیرد (Warkentin and Fletcher, 1977; Li *et al*., 2013 and Rezaei *et al*., 2006). از زمانی که سرویس حفاظت خاک[۱] (USDA) سیستم طبقه‌بندی خاک‌ها را در سال ۱۹۶۱ منتشر نمود، بسیاری از روش‌های ارزیابی کیفیت خاک توسعه یافت (Klingebiel and Montegomery, 1961). در شروع از شاخص‌های تکی مانند کربن‌آلی یا نیتروژن خاک برای این کار استفاده می‌شد. با درک عمیق‌تر از کیفیت خاک، روش‌های ارزیابی کامل‌تری که عملیات-های مدیریتی و تولید محصول را مورد توجه قرار می‌دهند، توسعه یافت (Andrews *et al*., 2004). در میان این روش‌ها، از شاخص کیفیت خاک[۲] (SQI) که شرایط خاک و ویژگی‌های مربوط به آن را به خوبی نشان داده می‌توان نام برد (Andrews *et al*., 2002). برتری این شاخص قابلیت استفاده آسان، انعطاف‌پذیری و کمی بودن است (Shahab *et al*., 2011). این شاخص برای طبقه‌بندی مناسب و تخصیص نهاده‌های کشاورزی معرفی شده (Warkentin and Fletcher, 1977) و بسیاری از ویژگی‌های شیمیایی، فیزیکی

* نویسنده مسئول: shabanpour@guilan.ac.ir

1. USDA Soil Conservation Service
2. Soil Quality Index

و بیولوژیکی خاک را در خود جای می‌دهد (Moebius *et al*., 2011). تحقیقات برای توسعه‌ی شاخص‌های کیفیت و توان خاک برای کارکردهای خود در زیست بوم در حال گسترش است؛ اما این کار ساده نیست. زیرا کیفیت خاک تحت‌تاثیر بسیاری از ویژگی‌های خاک بوده و این اثرات نسبی با تغییر مکان و زمان دست‌خوش تغییرات زیادی می‌گردد (Brady and Weil, 2008; Moebius *et al*., 2011). این موضوع در خاک‌های شالیزاری بیشتر چالش‌برانگیز است؛ زیرا در جریان گلخرابی[1]، ساختمان خاک از بین رفته، جرم‌مخصوص ظاهری تغییر یافته و هدایت هیدرولیکی کاهش می‌یابد که همه رویدادها سرانجام منتهی به یک محیط فیزیکی غیرمتعارف در خاک می‌شود (Painuli *et al*., 1988). البته حفظ کیفیت فیزیکی خاک برای به حداکثر رساندن عملکرد و دستیابی به یک سیستم پایدار کشاورزی ضروری است (Bergamin *et al*., 2015) زیرا کیفیت فیزیکی خاک برای نشان دادن شرایط فیزیکی محیط رشد گیاه (Silva and Kay, 1996)، شرایط شیمیایی (Drury *et al*., 2003) و شرایط بیولوژیکی خاک (Skopp *et al*., 1990) بسیار مهم و حیاتی است.

نتایج مطالعات Liu *et al*., (2014) در خاک‌های شالیزاری چین با استفاده از ۲۶ ویژگی فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک، نشان داد که بین شاخص کیفیت خاک و عملکرد برنج در سه سطح پایین، متوسط و بالا اختلاف معنی‌دار وجود دارد. آن‌ها با استفاده از تجزیه به مولفه‌های اصلی[2] (PCA) از کل ویژگیهای بررسی شده، مجموع داده‌های حداقل را جدا نمودند. سپس بین عملکرد و شاخص کیفیت خاک در هر دو روش کل مجموع داده‌ها[3] (TDS) و مجموع داده‌های حداقل[4] (MDS) همبستگی مثبت و معنی‌داری به‌دست آوردند، اما کیفیت خاک در روش TDS در سه کلاس عملکرد نسبت به میانگین کیفیت خاک در روش MDS دقیق‌تر بود. Bergamin *et al*., (2015) در بررسی اثرات شاخص‌های فیزیکی بر عملکرد گیاه ذرت از هشت ویژگی فیزیکی خاک استفاده نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد با افزایش منافذ درشت و کاهش مقاومت فروری خاک عملکرد ذرت افزایش یافت و در نهایت از ویژگی‌های فیزیکی مانند فراوانی منافذ درشت، پایداری خاکدانه و کاهش مقاومت فروری به عنوان شاخص‌های مناسبی برای بررسی کیفیت فیزیکی خاک نام بردند.

با توجه به شرایط خاص کشت برنج، عواملی مانند عملیات گلخرابی، از بین رفتن ساختمان و اشباع بودن خاک در فصل رشد برنج، تجزیه ناقص موادآلی و متغیر بودن تعادل عناصر غذایی بسته به شدت متفاوت شرایط احیایی خاک می‌توانند به غیر یکنواختی وضعیت خاک منجر شود. از این رو شاخص کیفیت خاک که در برگیرنده مجموع عوامل هستند در کنار عملکرد گیاه می‌تواند در شناخت وضعیت خاک‌های شالیزاری و راهکارهای مدیریتی کارآمد باشند. بر همین مبنا مطالعه حاضر با هدف ۱) تعیین کیفیت خاک اراضی شالیزاری به دو روش TDS و MDS و ۲) شناسایی محدودیت‌های عملکرد در کلاس‌های مختلف عملکردی انجام شد.

مواد روش‌ها

منطقه مورد مطالعه، نمونه‌برداری و اندازه‌گیری ویژگی‌ها

این مطالعه در شالیزارهای بخش مرکزی استان گیلان واقع در شمال ایران انجام شد. این ناحیه دارای خاک‌های آبرفتی مسطح و در محدوده‌ی شهرستان کوچصفهان با طول جغرافیایی ′33 °41 ′20 °41 – ′14 °40 و عرض جغرافیایی ′40 °38 قرار دارد و مساحت شالیزارهای آن نزدیک ۱۲هزار هکتار است.

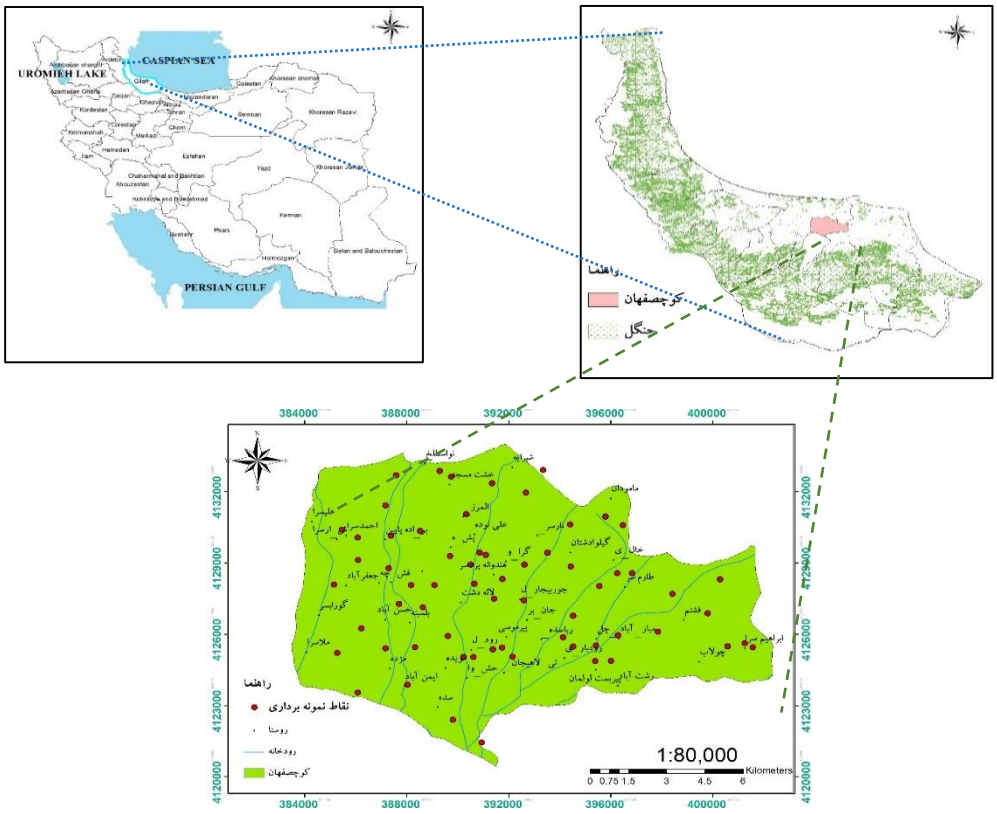
میانگین بارندگی سالیانه منطقه بررسی شده حدود ۱۳۵۹ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه ۱۵/۸ درجه سانتی‌گراد است. اقلیم آن بر پایه هر دو روش طبقه بندی دومارتن و آمبرژه، بسیار مرطوب است. هم‌چنین طبق نقشه رژیم رطوبتی و حرارتی خاک-های ایران (بنایی،۱۳۷۷)، خاک های منطقه دارای رژیم‌های رطوبتی یودیک و رژیم حرارتی مزیک و بر اساس سیستم طبقه‌بندی آمریکایی، در رده‌های انتی سول، اینسپتی سول و آلفی سول طبقه-بندی می‌شوند. آبیاری شالیزارهای برنج به روش غرقابی انجام می-شود. تاریخ نشاکاری از اوایل اردیبهشت ماه شروع و تا آخر این ماه ادامه می‌یابد. آماده‌سازی زمین برای نشاکاری برنج هر سال بین یک هفته تا یک ماه پیش از نشاکاری در اوایل فصل بهار انجام می‌شود. پس از تعیین محدوده اراضی شالیزاری با استفاده از Google Earth (Version Pro 4.2)، ۶۴ نمونه خاک دست خورده با توزیع جغرافیایی تقریبا یکنواخت از منطقه رشد ریشه برنج (عمق صفر تا ۲۵ سانتی-متر) تهیه شد. توصیف منطقه همراه با موقعیت نقاط نمونه‌برداری در شکل (۱) نشان داده شده است.

سپس نمونه خاک‌ها کاملا مخلوط، هوا خشک و باقیمانده ریشه گیاهان خارج گردید. خاک حاصله از الک دو میلی‌متری عبور داده تا برای آزمایشات آماده شوند. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی برای تعیین شاخص کیفیت خاک (SQI) انتخاب شدند. با توجه به ثابت بودن اثر اقلیم، نوع رقم و مدیریت تقریبا یکنواخت آبیاری، فرض می‌شود تفاوت عملکرد ناشی از وضعیت حاصلخیزی خاک، مدیریت تغذیه گیاه و خواص هیدرولیکی موثر خاک در نگهداری آب در خاک می‌باشد. بنابراین ویژگی‌ها بر پایه تحقیقات مختلف (Andrews *et al*, 2002, Andrews, and Carroll, 2001) و

3-Puddling
2- Principal Component Analysis

2-Total Data Set
3-Minimmum Data Set

با فرض این که پتانسیل ارزیابی SQI را داشته و بر تغییرات عملکرد موثر هستند، انتخاب گردیده‌اند. ویژگی‌های انتخاب شده و روش اندازه‌گیری و محاسبه آنها در جدول (۱) نشان داده شد.



شکل ۱- توصیف شماتیک از منطقه مطالعه شده با نقاط نمونه‌برداری

جدول ۱- روش‌های اندازه‌گیری ویژگی‌های انتخاب شده در منطقه مورد بررسی

ویژگی‌های خاک	روش آنالیز و محاسبه	منبع
pH	عصاره اشباع خاک	Thomas (1996)
پتاسیم قابل‌استفاده ($mg\ Kg^{-1}$)	استات آمونیوم یک نرمال	Sadusky *et al* (1987)
فسفرقابل‌استفاده ($mg\ Kg^{-1}$)	روش اولسن	Olsen and Sommers (1982)
نیتروژن کل (٪)	میکروکجلدال	Bremner and Mulvaney, 1982
روی قابل‌استفاده ($mg\ Kg^{-1}$)	عصاره‌گیری با DTPA	Lindsay *et al*. (1978)
کربن آلی (%)	والکلی بلاک	Nelson and Sommers, (1996)
ظرفیت تبادل کاتیونی ($Cmol\ Kg^{-1}$)	استات آمونیوم	Sumner and Miller, (1996)
فراوانی ذرات اولیه (٪)	هیدرومتری	Gee and Bauder, (1986)
شاخص S دکستر (-)	منحنی رطوبتی و توابع مربوطه	Dexter, (2004)
رطوبت اشباع ($cm^3\ cm^{-3}$)	آون خشک	Gardner, (1986)
رطوبت در نقطه پژمردگی ($cm^3\ cm^{-3}$)	صفحه فشاری	Dane and Hopmans, (2002)
آب قابل دسترس گیاه ($cm^3\ cm^{-3}$)	تفاضل رطوبت ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی	Hendrickson, (1931) Veihmeyer and
جرم‌مخصوص‌ظاهری ($g\ cm^{-3}$)	سیلندر	Blakeand Hartge, (1986)
شاخص پایداری ساختمان خاک (%)(StI)	توابع مربوطه	(1992) Pieri,
ضریب انبساط خطی (COLE)	توابع مربوطه	Parker *et al*. (1977)
انرژی انتگرالی آب قابل استفاده ($j\ Kg^{-1}$)(E_I)	توابع مربوطه	Minasny and McBratney, (2003)
هدایت هیدرولیکی اشباع ($cm\ day^{-1}$)	بار افتان	Booltink and Buma, (2002)
میانگین قطر منافذ (μm)(d_{mean})	توابع مربوطه	Reynolds *et al*. (2009)

- دکستر n , $= -n(\theta_{sat} - \theta_{res}).\left[1 + \frac{1}{m}\right]^{-(1+m)}$ شاخص S و m پارامترهای بدون بعد θ_{sat} ($kg.Kg^{-1}$) , θ_{res} رطوبت اشباع ($kg.Kg^{-1}$) مقدار رطوبت باقی‌مانده

$StI = \frac{1.72 \times SOC}{Clay+Silt} \times 100$, SOC: مقدار کربن آلی,

$COLE = \left(\frac{BD_{dry}}{BD_{wet}}\right)^{\frac{1}{3}} - 1$ BDdry: جرم مخصوص ظاهری خشک , BD_{wet}: جرم مخصوص ظاهری مرطوب

$E_I[\theta_i - \theta_f] = \frac{1}{\theta_i - \theta_f}\int_{\theta_f}^{\theta_i} \psi(\theta) d(\theta)$, :θf و θi به ترتیب رطوبت خاک در حد بالا و حد پایین آب قابل استفاده,

$d_{mean} = \exp(\frac{\ln d_{0.16} + \ln d_{0.50} + \ln d_{0.84}}{3})$ $d_{0.16}$, $d_{0.50}$, $d_{0.84}$: قطر خلل و فرج متناظر در رطوبتهای مورد نظر

تعیین شاخص کیفیت خاک

برای تعیین شاخص کیفیت خاک پنج مرحله اصلی دنبال شد: ۱) اندازه‌گیری عملکرد گیاه به عنوان متغیر هدف، ۲) انجام تجزیه به مولفه‌های اصلی برای تهیه یک مجموعه حداقلی داده، ۳) نمره-دهی و وزن‌دهی شاخص‌ها در دو روش TDS و MDS، ۴) دستیابی به یک شاخص تلفیقی کیفیت خاک برمبنای نمره‌دهی و وزن هریک از شاخص‌ها و ۵) تعیین شاخص‌های کیفیت خاک برای هر کلاس عملکرد و مقایسه آنها در دو روش MDS و TDS.

اندازه گیری عملکرد گیاه:

عملکرد سالیانه برنج به‌عنوان یک هدف مدیریتی برای ارزیابی شاخص کیفیت خاک انتخاب شد. در هنگام برداشت محصول، ۶۴ نمونه عملکرد (منطبق با نقاط نمونه برداری خاک) در ابعاد نیم‌متر در نیم‌متر برداشت شده و به آزمایشگاه انتقال یافتند. پس از حذف دانه‌های پوک، وزن دانه‌های پر بعد از۴۸ ساعت قرار گرفتن در۷۰ درجه سانتی گراد، تعیین شد. سپس مقدار محصول برای یک هکتار محاسبه و به‌عنوان نتایج عملکرد در نظر گرفته شد. سرانجام بر مبنای میانگین عملکرد در کل منطقه (حدود ۴۵۰۰ کیلوگرم بر هکتار) سه کلاس عملکردی: ۱)کلاس یک شامل مناطقی که عملکرد برنج در آنها کمتر از ۴۰۰۰ کیلوگرم بر هکتار، ۲) کلاس دو شامل مناطقی که عملکرد برنج در آنها بین ۴۰۰۰ تا ۴۵۰۰ کیلوگرم بر هکتار و ۳) کلاس سوم شامل مناطقی که عملکرد برنج در آنها بیش از ۴۵۰۰ کیلوگرم بر هکتار می‌باشد، تقسیم شدند.

انتخاب شاخص‌های موثر بر کیفیت خاک

شاخص‌های انتخابی برای تعیین کیفیت خاک بایستی به مدیریت خاک حساس، بیانگر حداقل یک عملکرد خاک و به راحتی قابل اندازه گیری باشد (Armenise *et al*., 2013) و از سوی دیگر مستقیما بر کیفیت خاک تاثیرگذار باشد (Govaerts *et al*, 2006). ویژگی‌های فیزیکی خاک، باروری خاک و عناصر غذایی کم‌مصرف همه عوامل مهمی هستند که می‌توانند بر کیفیت خاک تاثیرگذار باشند (Sun *et al*., 2003). برخی از محققین شاخص کیفیت خاک را بر مبنای کل ویژگی‌های اندازه‌گیری شده خاک (TDS) تعیین می‌کنند (Doran and Parkin, 1994)، و برخی دیگر از محققین مجموعه‌ای از حداقل داده‌ها (MDS) که نماینده کل ویژگی‌های خاک می‌باشد را به کار می‌برند (Andrews *et al*, 2002, Rezaei *et al*, 2006). در این تحقیق در تعیین شاخص کیفیت خاک، از دوروش TDS و MDS بر پایه PCA استفاده شد. برای تعیین شاخص‌های TDS، از آزمون مقایسه میانگین ویژگی‌های اندازه‌گیری شده در کلاس‌های مختلف عملکرد استفاده شد. تنها ویژگی‌هایی که در بین سه کلاس عملکرد اختلاف معنی‌دار داشتند، به‌عنوان اعضای TDS برای محاسبات SQI انتخاب شدند.

Doran and Parkin (1994) دو روش کلی نظریه کارشناسی و روش‌های ریاضی-آماری مانند معادلات رگرسیونی و PCA را برای انتخاب حداقل ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک نام بردند. استفاده از روش PCA برای تعیین یک حداقل مجموعه داده توسط محققین زیادی استفاده گردید (Cheng *et al*, 2016, Liu *et al*, 2014). این روش با کاهش داده‌ها، شاخص‌های کمتری اما با دقت بالا را انتخاب می‌کند. کاهش شاخص‌ها برای صرفه جویی در زمان و هزینه بسیار مناسب است (Sheidai *et al*., 2019). برای شناسایی ویژگی‌های بالقوه خاک که نماینده MDS هستند، از آنالیز مولفه اصلی PCA بر روی ماتریس داده استاندارد استفاده شد (Andrews *et al*, 2002).

پیش از انجام تجزیه به مولفه‌های اصلی لازم است دو موضوع ۱) کفایت نمونه‌برداری با استفاده از ضریب KMO (Kaiser, 1974) و ۲) رابطه قوی بین متغیرها (معناداری اطلاعات موجود در ماتریس همبستگی) با استفاده از آزمون کرویت بارتلت (Bartlett, 1954) بررسی شود. محدوده ضریب KMO از صفر تا یک است. چنانچه این ضریب بیش از نیم باشد داده‌ها برای تحلیل عاملی مناسب خواهند بود (Hair *et al*., 2006). در آزمون کرویت بارتلت اعداد با معنی‌داری بیش از ۹۵٪ ($p<0.05$) برای PCA مناسب است (Pallant, 2005). بعد از این دو آزمون تجزیه به مولفه‌های اصلی انجام می‌شود. مولفه‌هایی که ارزش ویژه[1] بزرگتر از یک داشتند به‌عنوان مولفه‌های موثر، جدا می‌گردند (Brejda *et al*. 2000). این مولفه‌ها تغییرات در اطلاعات را بیشتر از ویژگی فردی می‌توانند توصیف نمایند (Sharma, 1996). پس از تعیین مولفه‌های اصلی، در هر مولفه اصلی متغیرهایی که دارای بار عاملی بالا بودند جدا شدند. اختصاص متغیرها بعد از چرخش عامل‌ها انجام شد. چرخش عامل از طریق واریومکس برای تفسیر مولفه‌ها است. بار عاملی، همبستگی بین متغیرهای اصلی و عوامل را نشان می‌دهد. در هر مولفه اصلی فقط متغیرهایی که در محدوده‌ی ده درصد حد مطلق متغیر با بالاترین بار عاملی قرار داشتند انتخاب شدند (Andrews *et al*, 2004). برای کاهش افزونگی[2] درون هر مولفه اصلی از اندازه ضریب همبستگی خطی بین این متغیرها استفاده می‌شود. چنانچه ضریب همبستگی

1- Eigen Value

2- Redundancy

پیرسون کمتر از ۰/۶ باشد، متغیر بعدی نیز در مجموعه حداقلی داده باقی می‌ماند در غیر این صورت، حذف می‌گردد Li *et al*.,2013, Chen *et al*, 2013). تجزیه به مولفه های اصلی با استفاده از نرم افزار SPSS (Version 16.0) انجام شد.

نمره‌دهی و وزن‌دهی ویژگی‌ها در دو روش TDS و MDS

از آنجا که واحد ویژگی‌های گزینش شده با یکدیگر تفاوت دارند ، از توابع نمره‌دهی (Anderws *et al*, 2002) برای تبدیل کمیت ویژگی‌ها به مقادیر بین صفر و یک استفاده می شود. دو روش نمره‌دهی خطی و غیرخطی برای این منظور پیشنهاد می‌شود. سهولت استفاده و نیاز کمتر به اطلاعات اکوسیستم Liebig *et al*., 2001) از مزایای استفاده از نمره‌دهی خطی می‌باشد. در این تحقیق نیز از تابع استاندارد نمره‌دهی[1] برای نمره‌دهی شاخص‌ها در روش TDS و MDS استفاده شد. در این تابع، ویژگی‌ها به حالت صعودی یا نزولی درجه‌بندی می‌شود. درجه‌بندی آنها بر این اساس که مقادیر بالاتر از نظر عملکرد خوب یا بد هستند، می‌شود Biswas *et al*, (2017). به این منظور سه تابع در نظر گرفته شد. در اولین تابع، ویژگی خاک‌ها بر پایه اصطلاح "بیشتر بهتر است" رتبه‌بندی می‌شود. مقادیر هر ویژگی در گروه "بیشتر بهتر است" به بیشترین مقدار در گروه تقسیم می‌شود، به‌طوری‌که ویژگی با بیشترین مقدار رتبه یک می‌گیرد (تابع یک). در گروه "کمتر بهتر است"، مقادیر هر ویژگی به کمترین مقدار تقسیم می‌شوند، به طوری‌که متغیر یا کمترین مقدار رتبه یک را در گروه مربوطه می‌گیرد (تابع دو) و برای حالت "بهینه بهتر است" از ترکیب دو تابع یک و دو استفاده شد (تابع سوم). با این توابع تبدیل داده‌های اولیه در دامنه بین ۰/۱ تا ۱ قرار گرفتند. سه تابع زیر برای نمره‌دهی شاخص‌ها در دو روش MDS و TDS استفاده گردید (Andrews *et al*., 2002):

(رابطه ۱)

$$\text{SSF1:}f(x)\begin{cases}=0.1 & x<L\\ =0.1+\dfrac{0.9\times(x-L)}{(U-L)} & L\le x\le U\\ =1.0 & x>U\end{cases}$$

(رابطه ۲)

$$\text{SSF2:}f(x)=\begin{cases}=1.0 & x<L\\ =0.1+\dfrac{0.9\times(U-x)}{(U-L)} & L\le x\le U\\ =0.1 & x>U\end{cases}$$

(رابطه ۳)

$$\text{SSF3:}f(x)=\begin{cases}=0.1 & x<L_1\,,x>U_2\\ =0.1+\dfrac{0.9\times(x-L_1)}{(U_1-L_1)} & L_1\le x\le U_1\\ =1.0 & U_1\le x\le L_2\\ =0.1+\dfrac{0.9\times(U_2-x)}{(U_2-L_2)} & L_2<x<U_2\end{cases}$$

در این سه معادله، $f(x)$ مقادیر متغیرها بعد از تبدیل داده‌ها (بین ۰/۱ و ۱) L و U به ترتیب مقادیر حد بحرانی پایین و بالا هستند.

محققین برای وزن‌دهی از تجزیه به مولفه اصلی (Li *et al*, 2013; Gheng *et al*, 2016)، تحلیل رگرسیون چندگانه[2] (Cheng *et al*, 2016) و ضریب تغییرات (Ortega and Santibanez, 2007) استفاده می‌کنند. در این تحقیق از PCA برای وزن‌دهی استفاده شد. در این روش از شاخص اشتراک[3] می‌توان استفاده نمود. نسبت شاخص اشتراک هر ویژگی به مجموع این شاخص، وزن ویژگی مورد نظر را نشان می‌دهد. در این حالت هر ویژگی دارای شاخص اشتراک بالاتری باشد، وزن بیشتری گرفته و بخش بزرگتری از واریانس را می‌تواند توضیح دهد (Cheng *et al*, 2016).

تلفیق رتبه‌های کیفی به یک شاخص

پس از محاسبه تابع عضویت و وزن ویژگی‌ها در TDS و MDS شاخص کیفیت خاک با استفاده از رابطه زیر محاسبه گردید (Doran and Parkin ,1994):

$$SQI=\sum_{i=1}^{n}W_iSSF_i \qquad \text{(رابطه ۴)}$$

در اینجا W_i فاکتور وزن‌دهی تجزیه به مولفه‌های اصلی، SSF_i شاخص نمره‌دهی و n تعداد شاخص‌های خاک.

آنالیزهای آماری

برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون حداقل تفاوت معنی‌داری فیشر[4] در سطح احتمال پنج درصد و برای همبستگی خطی بین ویژگی‌های از ضریب همبستگی پیرسون استفاده شد. تجزیه و تحلیل داده ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS (Version 16.0) و برای رسم نمودارها و محاسبات مربوطه با از نرم‌افزار Excel (version 2013) استفاده شد.

نتایج و بحث

آمار توصیفی

آماره‌های توصیفی ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک شامل کرانه‌ها (حداقل و حداکثر)، آماره‌ی مرکزیت (میانگین) و آماره پراکندگی (انحراف معیار) در سه کلاس مختلف عملکرد به ترتیب جداول (۲) و (۳) آورده شدند. حد بحرانی نیتروژن کل برای کشت برنج دو دهم درصد است (Doberman and Fairhurst, 2000).

1. Standard Scoring Function
2. Multiple regression analysis
3. Communality
4. Fisher's least significant difference test (LSD)

میانگین نیتروژن کل (کمتر از حد بحرانی) در کلاس یک، با کمترین میانگین عملکرد، از دیگر کلاس‌ها نیتروژن دیده می‌شود. نیتروژن با تاثیر بر افزایش فعالیت آنریم‌های فتوسنتزی و غلظت کلروفیل در مراکز واکنش فتوسنتزی اثر مستقیمی بر مقدار فتوسنتز بر واحد سطح، رشد و عملکرد گیاه دارد (Cechin 1997). برطرف کردن کمبود نیتروژن آسان و پاسخ گیاه به مصرف کود نیتروژنی سریع است. پاسخ گیاه به مصرف کود نیتروژنی تقریباً بعد از ۲ تا ۳ روز پدیدار می‌شود. البته این امر به رقم برنج، نوع خاک، شرایط آب و هوایی، نوع کود نیتروژنی مصرف شده، مقدار، زمان و روش مصرف کود بستگی دارد (Doberman and Fairhurst, 2000).

میانگین فسفر قابل‌استفاده در کلاس اول و دوم کمتر از حد بحرانی (۱۲میلی‌گرم بر کیلوگرم) بوده، از این‌رو به نظر می‌رسد پاسخ گیاهان واقع در خاک‌های این مزارع به کوددهی مناسب باشد. البته برای دریافت پاسخ مناسب به مصرف کود فسفره، برطرف کردن کمبود عناصر غذایی دیگر (نیتروژن، پتاسیم و روی) و برطرف کردن دیگر مشکلات خاک (عمق کم ریشه‌زنی، سمیت‌ها) و اطمینان از اعمال مدیریت زراعی صحیح و همه جانبه ضروری است (Doberman and Fairhurst, 2000) . کمبود فسفر به دلیل مدیریت نامناسب کودهای فسفری (Brady and Weil, 2008) به همراه کشت پیوسته برنج و محدودیت منابع ذاتی فسفر خاک از عوامل اصلی بازدارنده تولید برنج در اراضی شالیزاری شمرده می‌شود (Doberman and Fairhurst, 2000). در صورت عدم کاربرد منابع فسفری به خاک، تخلیه مداوم فسفر در اثر مصرف آن توسط گیاه سبب کاهش شدید این عنصر از منابع ذاتی خاک می‌شود.

جدول ۲-آمار توصیفی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی در سه کلاس عملکرد

ویژگی خاک	کلاس یک		کلاس دو		کلاس سه	
	میانگین ± انحراف معیار	دامنه	میانگین ± انحراف معیار	دامنه	میانگین ± انحراف معیار	دامنه
pH	۷/۳۲±۰/۱۳a	۷/۰۶-۷/۵۱	۷/۲۴±۰/۱۸ab	۶/۸۴-۷/۶۰	۷/۱۶±۰/۱۶b	۶/۸۷-۷/۴۹
پتاسیم‌قابل‌استفاده ($mg\ Kg^{-1}$)	۲۱/۴±۶۰/۷a	۹۴/۸-۳۴۵	۲۳۷/۷±۵۲/۹ab	۱۵۴/۴-۳۳۸	۲۶۲/۴±۴۵/۰b	۱۵۴-۳۴۵
فسفرقابل‌استفاده ($mg\ Kg^{-1}$)	۹/۶±۵/۴a	۲/۸-۱۷/۷	۱۱/۴±۸/۷b	۴/۴۲±۳۷/۸	۱۴/۱۸±۹/۴b	۴/۵±۳۹/۸
نیتروژن کل (٪)	۰/۱۶±۰/۰۴a	۰/۱۱-۰/۲۴	۰/۲۲±۰/۰۹b	۰/۱-۰/۴۱	۰/۲۳±۰/۰۹b	۰/۱۴-۰/۵۶
روی‌قابل‌استفاده ($mg\ Kg^{-1}$)	۹/۰±۵/۳a	۱/۷-۱۷/۲	۱۰/۴±۵/۴a	۲/۶-۲۱/۴	۱۳/۴±۸/۲b	۳/۴-۳۲/۰
کربن آلی (٪)	۱/۵۳±۰/۳۵a	۱/۰۵-۲/۳۰	۲/۲۰±۰/۹۰b	۱/۰۴-۴/۱۴	۲/۳۴±۱/۲۰b	۱/۲۰-۵/۷۲
ظرفیت تبادل کاتیونی($Cmol\ Kg^{-1}$)	۳۲/۵۴±۵/۴a	۱۷/۲-۳۷/۷	۳۶/۴±۴/۲b	۲۸/۶-۴۴/۰	۳۶/۴±۴/۴۷b	۲۷/۱-۴۲/۴
رس (٪)	۴۰/۱±۷/۹a	۲۲/۰-۵۴/۰	۴۳/۶±۱۰/۶b	۲۰/۰-۶۰/۰	۴۲/۶±۷/۷b	۲۷/۰-۵۵/۰
سیلت (٪)	۴۲/۶±۴/۶a	۳۱/۰-۴۹/۰	۴۵/۴±۶/۴a	۳۱/۰-۶۰/۰	۴۴/۳±۵/۲a	۳۳/۰-۵۷/۰
شن (٪)	۱۵/۱±۱۰/۸a	۲/۰-۴۷/۰	۱۱/۰۵±۸/۴a	۱/۰-۳۲/۰	۱۳/۱±۶/۷a	۶/۰-۲۸/۰
شاخص-S دکستر (-)	۰/۰۶۰±۰/۰۲a	۰/۰۲-۰/۰۹	۰/۰۶۹±۰/۰۲a	۰/۰۲-۰/۱۲	۰/۰۶۸±۰/۰۲a	۰/۰۱-۰/۱۱
رطوبت اشباع ($cm^3\ cm^{-3}$)	۰/۵۶±۰/۰۶a	۰/۳۵-۰/۶۱	۰/۶۱±۰/۰۵b	۰/۳۷-۰/۵۹	۰/۶۲±۰/۰۵b	۰/۵۳-۰/۸۱
رطوبت نقطه پژمردگی ($cm^3\ cm^{-3}$)	۰/۲۱±۰/۰۳a	۰/۱۶-۰/۳۱	۰/۲۴±۰/۰۳b	۰/۱۷-۰/۲۸	۰/۲۵±۰/۰۳b	۰/۱۹-۰/۳۸
آب قابل دسترس گیاه (cm3 cm-3)	۰/۳۰±۰/۰۲a	۰/۳۰-۰/۳۸	۰/۳۵±۰/۰۴bc	۰/۲۸-۰/۴۴	۰/۳۵±۰/۰۵ac	۰/۳۰-۰/۵۲
جرم‌مخصوص‌ظاهری ($g\ cm^{-3}$)	۰/۹۲±۰/۰۸a	۰/۸۲-۱/۱۱	۰/۸۴±۰/۰۷b	۰/۷۵-۰/۹۵	۰/۸۴±۰/۰۹b	۰/۶-۱/۱۱
شاخص پایداری ساختمان (٪)	۳/۲±۰/۸۳a	۱/۹۰-۴/۸	۴/۳۷±۲/۱۱b	۱/۹۱-۱۰/۴۸	۴/۷۴±۲/۳b	۲/۲۰-۱۳/۷
ضریب انبساط خطی(-)	۰/۱۵±۰/۰۲a	۰/۰۹-۰/۱۷	۰/۱۷±۰/۰۲b	۰/۱۴-۰/۲۰	۰/۱۷±۰/۰۲b	۰/۱۴-۰/۲۴
انرژی انتگرالی ($j\ Kg^{-1}$)	۱۴۵/۷±۴۹a	۱۲۰-۲۷۹	۱۳۴±۷/۶	۱۲۴-۱۵۶	۱۳۲±۹/۰	۱۲۰-۱۶۲
هدایت هیدرولیکی اشباع ($cm\ day^{-1}$)	۰/۱۴±۰/۱a	۰/۰۷-۰/۲۵	۰/۲۲±۰/۲b	۰/۰۶-۰/۷۳	۰/۲۲±۰/۱b	۰/۰۷-۰/۷۹
قطر میانگین منافذ (µm)	۲/۹۸±۰/۶۲a	۱/۲۰-۳/۵	۳/۰۳±۰/۲۷a	۲/۵۶-۳/۴۶	۲/۹±۰/۵۲a	۱/۲۰-۳/۵۸
عملکرد ($ton\ hec^{-1}$)	۳۵۳۲±۳۱۰/۶a	۴۰۰۰-۲۷۳۰	۴۲۴۴±۱۷۴/۰b	۴۵۰۰-۴۰۲۰	۴۹۷۸±۳۴۲/۵c	۵۹۰۰-۴۵۳۶

میانگین کربن‌آلی در کلاس اول با اختلاف معنی‌دار از دو کلاس دوم و سوم کمتر است. این ویژگی هم بر حاصلخیزی خاک (نقش حیاتی در نگهداری و آزادسازی عناصر غذایی) و هم بر خصوصیات فیزیکی خاک (بهبود ساختمان خاک، تخلخل، نگهداری آب) تأثیر انکار ناپذیر دارد (Li *et al*., 2007). از این رو کمبود آن می‌تواند منجر به کاهش کیفیت خاک و در نهایت کاهش عملکرد شود. پژوهشگران زیادی (Fan *et al*., ؛ Pan *et al*., 2009 2008) از همبستگی مثبت و معنی‌دار بین عملکرد غلات و مقدار مواد آلی سخن گفته و نشان دادند که مواد آلی نقش مهمی در افزایش و بهبود کیفیت خاک داشته و می‌تواند منجر به عملکرد

بیشتر غلات از جمله برنج شود. خروج یا سوزاندن کاه و کلش گیاه برنج از اراضی شالیزاری بعد از فصل برداشت و استفاده نکردن بسیاری از کشاورزان از کودهای دامی پوسیده به عنوان کودآلی در درازمدت می‌تواند عامل اصلی کاهش معنی‌دار کربن‌آلی و در ادامه آن کاهش عملکرد گردد (Doberman and Fairhurst, 2000).

میانگین CEC کلاس اول از دو کلاس دیگر عملکرد به طور معنی‌دار کمتراست. CEC می‌تواند به عنوان یک شاخص حساس برای ارزیابی حاصل‌خیزی خاک و یک شاخص مهم برای بهبود کارایی مصرف کود و کیفیت خاک است (Smaling, and Braun, 1996)، اگرچه مواد جامد خاک به درجات مختلف در ایجاد مکان‌های تبادل کاتیونی نقش دارند، اما این خصوصیت در بیشتر خاک‌ها در بخش رس و موادآلی آنها متمرکز است (Seybold *et al*., 2008). در بین اجزای اصلی بافت خاک در سه کلاس عملکردی تنها مقدار رس کلاس اول دارای تفاوت معنی‌دار با دو کلاس دیگر بود. کمترین میانگین درصد رس (40.1%) و بالاترین مقدار شن (15.1%) نیز در کلاس یک با کمترین عملکرد دیده می‌شود. Liu *et al*. (2014) نیز بیش‌ترین مقادیر شن را در کلاس عملکردی کم گزارش نمودند.

Torabi Golsefidi (2001) نشان داد کانی‌های رس اسمکتیتی در خاکهای الویال استان گیلان زیاد بوده و از مشخصات این کانی‌ها مقدار زیاد سطح ویژه و CEC است. این رس‌ها با جذب رطوبت منبسط می‌شوند و در نتیجه این خاک‌ها پتانسیل زیادی برای انقباض و انبساط دارند. Deng *et al*. (2017) یک همبستگی مثبت بین CEC و پتانسیل انبساط و انقباض را نشان دادند. یکی از مهمترین روش‌های بررسی انقباض و انبساط خاک‌های رسی ضریب انبساط خطی[1] می‌باشد (Gebhardt *et al*., 2012). میانگین COLE در کلاس عملکری یک به طور معنی‌داری از دو کلاس دیگر کمتر است. بر پایه کلاس‌بندی پارکر (۱۹۷۷) (COLE کمتر از ۰/۰۳~ انبساط و انقباض کم، COLE بین ۰/۰۳ تا ۰/۰۶~ انبساط و انقباض متوسط، COLE بین ۰/۰۶ تا ۰/۰۹~ انبساط و انقباض زیاد و COLE بیش از ۰/۰۹ انبساط و انقباض خیلی زیاد) تمامی نمونه خاک‌ها در گروه بسیار زیاد قرار دارد. زیاد بودن COLE نشان‌دهنده ظرفیت بیشتر برای انقباض و انبساط خاک‌ها شالیزاری است. یک همبستگی قوی بین شاخص‌های انقباض و ترک در خاک‌های شالیزاری استان گیلان وجود دارد (Yazdani *et al*. 2014). از این رو تا پیش از رسیدن به این مرحله از مکش ایجاد ترک، رطوبت خاک را بایستی اصلاح نمود.

جرم‌مخصوص‌ظاهری (BD) کلاس اول با کمترین عملکرد با دو کلاس دیگر اختلاف معنی‌دار دارد و بالاترین BD را نیز در کلاس اول وجود دارد. BD به عنوان یک پارامتر کیفیت فیزیکی خاک در نظر گرفته می‌شود، زیرا به‌طور غیرمستقیم در ارتباط با رطوبت خاک و مقاومت مکانیکی در مقابل رشد ریشه است (Reynolds *et al*., 2009). این شاخص مهم فیزیکی به بافت خاک، مقدار ماده‌آلی خاک و عملیات مدیریتی وابسته است (Wolf and Snyder, 2003) و تعیین‌کننده حجم آب و هوا، تحرک‌پذیری و قابلیت دسترسی گیاه و توسعه سیستم ریشه‌ایی است. از این رو بر رشد محصول و توسعه و عملکرد اثرگذار است (Nazarenko *et al*., 2004). مقایسه خاک‌ها در سه کلاس عملکرد نشان می‌دهد خاک‌های کلاس عملکردی یک (عملکرد پایین) با رس، موادآلی و CEC پایین‌تر دارای جرم‌مخصوص ظاهری بیشتری هستند. Liu *et al*. (2014) نیز بالاترین BD را در خاک‌هایی با کمترین عملکرد گزارش نمودند. انرژی انتگرالی[2] (E_I)، بیانگر مقدار انرژی نیازمندگیاه برای جذب واحد حجم آب خاک در محدوده ظرفیت آب قابل دسترس است. میانگین E_I در دو کلاس دوم و سوم عملکردی با یکدیگر اختلاف معنی‌دار نداشته اما میانگین E_I این دو کلاس با کلاس اول دارای اختلاف معنی‌دار بود. E_I به شیوه‌های مدیریتی خاک بسیار حساس است. هر چه انرژی انتگرالی خاکی کمتر باشد گیاه انرژی کمتری برای غلبه بر مکش خاک نیاز دارد. میانگین انرژی انتگرالی از خاک‌هایی با عملکرد کم به سمت عملکردهای بیشتر روند نزولی نشان دادند. در واقع خاک‌هایی با عملکرد بیشتر دارای انرژی انتگرالی کمتری بودند (جدول ۲).

تعیین شاخص کیفیت خاک

تعیین مجموعه حداقل داده

نتایج دو آزمون KMO و کرویت بارتلت در جدول (۳) نشان داد که بر پایه KMO حجم نمونه برای تحلیل عاملی کافی و بر پایه آزمون کرویت بارتلت فرض مستقل بودن متغیرها از یکدیگر، رد شد ($p< 0.05$). این نتایج نشان داد که تجزیه به مؤلفه‌های اصلی می‌تواند برای کاهش تعداد داده و متغیرهای مورد مطالعه سودمند باشد. از سوی دیگر ماتریس ضریب همبستگی خطی بین ویژگی-های فیزیکی و شیمیایی خاک (جدول ۵) نشان داد که ۱۰۲ جفت مقایسه از ۲۱۰ جفت، در سطح احتمال یک و پنج درصد معنی‌دار بودند. از این رو نتایج تحلیل مولفه‌ی اصلی برای کاهش داده‌ها قابل توجیه است، زیرا از همبستگی موازی بین داده‌ها، جلوگیری می‌شود. از میان ویژگی‌های مطالعه شده ۱۶ ویژگی که بر پایه

1- Coefficient Of Linear Extensibility (COLE)

1-Integral Energy

آزمون مقایسه میانگین در کلاس‌های عملکردی مختلف دارای تفاوت معنی‌دار بودند، به عنوان شاخص‌های انتخابی برای روش TDS انتخاب شدند، و ویژگی‌های سیلت، شن، شاخص-S دکستر، شاخص پایداری و میانگین قطر منافذ حذف گردید. از سوی دیگر این ۱۶ ویژگی به عنوان ویژگی‌های ورودی در تجزیه مولفه‌های اصلی برای تعیین MDS نیز استفاده شدند.

جدول ۳- نتایج آزمون کیسرمیرالکین (KMO) و کرویت بارتلت برای ویژگی‌های منطقه مطالعه شده.

مقدار KMO برای کفایت نمونه‌گیری		۰/۷۳
آزمون کرویت بارتلت	تقریب کای-دو	۱۰۴۲/۶
	درجه آزادی	۱۲۰
	معنی‌دار بودن	۰/۰۰۰

تجزیه به مولفه‌های اصلی نشان داد که چهار مؤلفه اول (PC1, PC2, PC3 and PC4) که دارای مقادیر ویژه بیش از ۱ می‌باشند و توانستند ۷۴ درصد واریانس کل را تشریح نمایند (جدول۶).

اولین مولفه اصلی (PC1)، حدود ۳۴ درصد از کل واریانس را تشریح نموده و سه ویژگی رطوبت اشباع، COLE و PAW در این PC دارای بالاترین بارعاملی می‌باشد. رطوبت اشباع و PAW در ارتباط مستقیم با گنجایش رطوبت خاک بوده و COLE نیز شاخصی از ظرفیت انبساط و انقباض خاک است که بر توانایی خاک در نگهداری آب اثر می‌گذارد. از این رو اولین مولفه اصلی را می‌توان "جزء گنجایش رطوبتی خاک" نامید. بیشترین بار عاملی مثبت با درصد رطوبت اشباع (۰/۸۹۸) بود و بعد از آن COLE با بار عاملی ۰/۸۹۵، و PAW با بار عاملی ۰/۸۷۱ در محدوده ده درصد بیشترین بار عاملی شاخص اول (رطوبت اشباع) قرار داشتند. ضریب همبستگی خطی بین رطوبت اشباع و دو ویژگی دیگر (COLE and PAW) بیش از ۰/۶ بود. از این‌رو تنها رطوبت اشباع (با بیشترین بارعاملی) به عنوان تنها شاخص مولفه اول برای تعیین MDS انتخاب شد.

مولفه دوم (PC2) که حدود ۱۷ درصد از کل واریانس را تشریح می‌نماید، دارای بیشترین بار عاملی مثبت با نیتروژن کل (۰/۸۴۲) و بعد از آن کربن آلی با بار عاملی ۰/۸۲۵ و سرانجام فسفر قابل‌استفاده با بار عاملی ۰/۷۶ است. بنابراین دومین مولفه اصلی را می‌توان "جزء نقش کربن‌آلی در تامین نیتروژن و فسفر خاک" نامید. Lan *et al*. (2012) در بررسی شکل‌های مختلف فسفر در رژیم‌های متفاوت کوددهی در شالیزارهای چین نشان دادند که ۵۰ تا ۷۵ درصد از فسفر خاک به صورت فسفرآلی است. این موضوع می‌تواند دلیل همبستگی مثبت و معنی‌دار بین فسفر قابل‌استفاده و کربن‌آلی در خاکهای شالیزاری باشد (سلطانی و همکاران، ۱۳۹۶). Kolawole and Tian (2007) نشان دادند که موادآلی دارای ظرفیت کلاته‌کننده معنی‌داری هستند که منجر به کم کردن فعالیت کاتیون‌های چندظرفیته (AL, Fe, Ca) تثبیت‌کننده‌ی فسفر بوده و با تشکیل کمپلکس آلی-فلزی، فسفر را از شکل‌های تثبیت شده آن به محلول خاک آزاد کنند. مهمترین منبع بومی تامین‌کننده‌ی نیتروژن در اراضی شالیزاری کربن‌آلی می‌باشد (Doberman and Fairhurst, 2000). از سوی دیگر این دو ویژگی در منطقه بررسی شده دارای همبستگی قوی و مثبت معنی‌دار (۰/۹۶) بود (جدول۵). Andrews *et al*. (2002) و Andrews and Carroll (2001) گزارش نمودند که نیتروژن خاک یک متغیر مهم بوده که در هنگام محاسبه SQI بایستی در MDS گنجانده شود. بنابراین نیتروژن کل به عنوان اولین شاخص از PC2 در MDS انتخاب می‌گردد. از سوی دیگر از آنجائی‌که ضریب همبستگی بین نیتروژن کل و فسفر قابل استفاده کمتر از ۰/۶ بود (جدول۵)، بنابراین در کنار نیتروژن، فسفر نیز به عنوان شاخص دیگر در MDS انتخاب شد.

مولفه سوم (PC3) حدود ۱۶ درصد از کل واریانس را توجیه می‌کند. در این مولفه درصد رس و پتاسیم قابل‌استفاده به ترتیب با بارعاملی ۰/۷۷ و ۰/۶۹ دارای بیشترین بار عاملی بودند. این دو ویژگی دارای همبستگی معنی‌دار (۰/۶۲) نیز بودند. بیشترین سهم پتاسیم قابل‌استفاده در سایت‌های تبادلی ذرات رس نگهداری می‌شود (Doberman and Fairhurst, 2000) از این رو PC3 را "رس و نقش آن در نگهداری پتاسیم" می‌توان نامید. درصد رس به‌عنوان تنها شاخص در PC3 باقی ماند زیرا بار عاملی رس بیشتر بوده و بین رس و پتاسیم قابل‌استفاده همبستگی معنی‌دار وجود دارد.

در PC4 انرژی انتگرالی آب دارای بالاترین بار عاملی بوده و ویژگی دیگری در این مولفه در محدوده‌ی ده درصدی این بار عاملی قرار نداشت. از این رو انرژی انتگرالی به عنوان پنجمین شاخص در MDS انتخاب شد.

بر مبنای تجزیه به مولفه اصلی از بین کل ویژگی‌های

اندازه‌گیری شده، پنج ویژگی رطوبت اشباع، نیتروژن کل، فسفر قابل‌استفاده، درصد رس و انرژی انتگرالی به عنوان مجموعه حداقلی داده انتخاب شد. علیرغم اینکه برنج بیشتر به صورت غرقاب کشت می‌شود، کنترل آب مهم‌ترین عملیات مدیریتی مؤثر بر میزان سودمندی دیگر نهاده‌های تولید (مانند عناصر غذایی، آفت کش و علف‌کش) در کشت برنج است. بنابراین اجزای رطوبتی این خاک‌ها می‌تواند اثرات مهمی در عملکرد داشته باشد. از رطوبت اشباع و انرژی انتگرالی آب به عنوان شاخص‌های مهم رطوبتی می‌توان نام برد، که در MDS باقی ماندند. در بین عناصر غذایی، نیتروژن مهم‌ترین و محدودکننده‌ترین عنصر موثر در رشد و نمو گیاه برنج محسوب می‌شود مصرف مقدار و زمان مناسب کودهای نیتروزنی سهم به‌سزایی در افزایش عملکرد مختلف برنج دارد (Doberman and Fairhurst, 2000). فسفر نیز یکی دیگر از مهم‌ترین عناصر ضروری مورد نیاز گیاهان است که باعث افزایش رشد و قوی‌تر شدن ریشه‌ها، قوی و ضخیم شدن ساقه‌ها، پرحجم شدن دانه‌ها، در نهایت موجب افزایش میزان عملکرد خواهد شد. Raiesi (2017) بیان نمود که ذرات خاک مانند رس مشارکت معنی‌داری در تعیین کیفیت خاک دارد زیرا اثرات زیادی در چرخه تغذیه خاک دارد، زیرا درصد رس (جزئی از بافت خاک) تاثیر بسیار زیادی بر ظرفیت نگهداری رطوبت، زهکش خاک، تهویه و درجه حرارت، حاصلخیزی و عملکرد گیاه دارد.

نمره‌دهی و وزن‌دهی شاخص‌ها

از توابع نمره‌دهی خطی برای استانداردسازی ویژگی‌ها و تبدیل آنها به مقادیر بین صفر و یک استفاده می شود. در این تحقیق حدود بحرانی برای ویژگیهای فیزیکی و شیمیایی انتخاب شده با استفاده از منابع Pieri (1992)، Parker *et al*. (1977)، Reynolds *et al*. (2009) و متخصصان موسسه تحقیقات برنج کشور مشخص شدند. در این راستا ویژگی‌هایی مانند کربن آلی، CEC، روی، نیتروژن کل، فسفر و پتاسیم قابل استفاده، درصد رس، رطوبت اشباع، رطوبت در نقطه پژمردگی، PAW و COLE بدلیل نقش شان در تامین، قابلیت دسترسی عناصر غذایی و دسترسی گیاه به رطوبت در گروه "بیشتر بهتر است" معادله(۱)، قرار گرفتند (Tesfahunegn, 2014).

جدول ۴- مقدار ویژه، سهم هر مولفه، واریانس تجمعی و بار عاملی ویژگی‌های خاک با استفاده از تحلیل مولفه‌های اصلی

	PC1	PC2	PC3	PC4
مقدار ویژه	۵/۴۱	۲/۷۴	۲/۵۵	۱/۱۳
واریانس	۳۳/۸۲	۱۷/۱۶	۱۵/۹۴	۷/۰۵
واریانس تجمعی	۳۳/۸۲	۵۰/۹۹	۶۶/۹۳	۷۴/۰
بار عاملی				
pH	-۰/۲۰۳	-۰/۷۳۳	-۰/۰۰۶	-۰/۱۶۲
پتاسیم قابل‌استفاده	۰/۵۵۵	۰/۰۸۵	۰/۶۹۰	۰/۰۶۴
فسفرقابل‌استفاده	-/۰۳۰	۰/۷۶	-۰/۲۲۷	-۰/۰۳۵
نیتروژن کل	۰/۴۱۹	۰/۸۴۳	-۰/۰۶۹	۰/۱۰۸
روی قابل‌استفاده	-۰/۰۶۰	۰/۶۲۹	۰/۲۳۲	-۰/۰۴۲
کربن آلی	۰/۴۲۵	۰/۸۲۶	-۰/۰۸۸	۰/۱۱۴
ظرفیت تبادل کاتیونی	۰/۳۹۱	۰/۲۴۳	۰/۵۳۱	۰/۲۳۶
رس	۰/۲۴۷	-۰/۴۴۰	۰/۷۷۱	۰/۰۸۹
رطوبت اشباع	۰/۸۹۸	۰/۱۶۰	۰/۱۳۱	-۰/۰۵۵
رطوبت نقطه پژمردگی	۰/۱۰۶	۰/۳۳۳	۰/۶۱۳	۰/۴۷۲
آب قابل دسترس	۰/۸۷۱	-۰/۰۵۸	-۰/۱۲۷	۰/۰۴۹
انرژی انتگرالی	-۰/۲۴۳	۰/۰۴۶	۰/۰۲۳	۰/۹۳۰
ضریب انبساط خطی	۰/۸۹۵	۰/۳۱۱	۰/۱۷۰	-۰/۱۹۴
جرم‌مخصوص‌ظاهری	-۰/۷۴۹۹	-۰/۳۸۳	-۰/۲۱۶	۰/۳۶۸
هدایت هیدرولیکی	۰/۳۱۱	۰/۶۲۶	۰/۲۳۲	-۰/۰۴۲

PC: مولفه اصلی

جدول ۵- همبستگی پیرسون بین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی در منطقه مطالعه شده.

	pH	AK	AP	TN	O.C	Zn	CEC	Clay	Silt	Sand	Sgi	sθ	PWP	PAW	BD	SI	COLE	E_I	Ks	d_{mean}
pH	۱																			
AK	-۰/۰۸	۱																		
AP	-۰/۳۸**	-۰/۰۸۹	۱																	
TN	-۰/۶۲**	۰/۱۰	۰/۳۹**	۱																
O.C	-۰/۶۴**	۰/۰۷	۰/۴۳**	۰/۹۶**	۱															
Zn	-۰/۱۹*	۰/۲۱*	۰/۱۳	۰/۲۳**	۰/۲۳**	۱														
CEC	۰/۱۷	۰/۴۲**	۰/۰۴۲	۰/۲۹**	۰/۲۶**	۰/۱۱	۱													
Clay	۰/۲۲**	۰/۶۲**	-۰/۴۲**	-۰/۲۵**	-۰/۲۶**	۰/۰۱	۰/۳۲**	۱												
Silt	-۰/۱۷	-۰/۲**	۰/۲۴**	۰/۱	۰/۱۱	-۰/۱۱	۰/۱۲	-۰/۵۲**	۱											
Sand	-۰/۱۳	۰/۵۷**	۰/۳۱**	۰/۲۲**	۰/۲۳**	۰/۰۷	-۰/۴۵**	-۰/۷۹**	-۰/۱۲	۱										
Sgi	-۰/۱۱	۰/۰۹	-۰/۰۱	-۰/۰۸	-۰/۰۴	۰/۰۳	-۰/۰۴	-۰/۰۸	۰/۰۲	۰/۰۸	۱									
sθ	-۰/۳۲**	۰/۴۲**	۰/۱۳	۰/۶۶**	۰/۶۴**	۰/۱۶	۰/۴۲**	۰/۲۲*	-۰/۱۱	-۰/۱۸*	-۰/۰۶	۱								
PWP	۰/۴**	۰/۵۱**	۰/۱۷*	۰/۶۹**	۰/۶۸**	۰/۲۰*	۰/۵۲**	۰/۳۵**	-۰/۰۸	-۰/۳۵**	-۰/۰۱	۰/۷۶**	۱							
PAW	-۰/۰۴	۰/۲۱*	۰/۰۰۱	۰/۲۷**	۰/۲۵**	۰/۰۸	۰/۲۵**	۰/۱۵	-۰/۱۱	۰/۱۰	-۰/۱۰	۰/۷۴**	۰/۳۰**	۱						
BD	۰/۳۳**	-۰/۴**	-۰/۱۸۴*	-۰/۶۶**	-۰/۶۵**	-۰/۱۵	-۰/۴۲**	-۰/۲۱**	۰/۰۶	۰/۲۱**	۰/۰۵	-۰/۹۱**	-۰/۷۹**	-۰/۵۲**	۱					
SI	-۰/۶۰**	-۰/۰۲	۰/۴۶**	۰/۹۴**	۰/۹۸**	۰/۲۳**	۰/۱۷	-۰/۳۹**	۰/۰۷	۰/۴۰**	-۰/۰۳	۰/۵۷**	۰/۵۸**	۰/۲۲*	-۰/۵۸**	۱				
COLE	-۰/۳۱**	۰/۴۰**	۰/۱۳۳	۰/۶۴**	۰/۶۲**	۰/۱۷	۰/۴۴**	۰/۲۱*	-۰/۰۷	-۰/۱۹*	-۰/۰۶	۰/۹۷**	۰/۷۶**	۰/۷۳**	-۰/۹۱**	۵۰۵**	۱			
E_I	-۰/۰۸	-۰/۰۶	۰/۰۰۶	۰/۰۳۵	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۶	-۰/۰۳	۰/۰۷	-۰/۰۲	-۰/۰۴	-۰/۳۰**	-۰/۰۷	-۰/۱۳	۰/۴۵**	۰/۰۱۶	-۰/۳۲**	۱		
Ks	۰/۰۰	-۰/۰۵	۰/۰۹	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۴	۰/۰۴	-۰/۱۴	۰/۱۴	۰/۰۶	۰/۰۳	۰/۰۹	۰/۰۶	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۱۰	-۰/۰۸	۱	
d_{mean}	۰/۱۳	-۰/۱۹*	-۰/۰۵	-۰/۱۳	-۰/۱۴	-۰/۱۵	-۰/۲۲*	۰/۱۴	۰/۱۶	-۰/۱۳	۰/۰۱	-۰/۳۵**	۰/۰۶	-۰/۱۰	-۰/۱۰	۰/۰۳	-۰/۷**	-۰/۰۶	-۰/۰۶	۱

* و ** به ترتیب معنی‌دار در سطح یک و پنج درصد. :AK : پتاسیم قابل‌استفاده، AP: فسفر قابل استفاده، TN:نیتروژن کل، O.C:کربن آلی، Zn:روی قابل‌استفاده، CEC:ظرفیت تبادل کاتیونی،Clay:درصد رس، Silt: درصد سیلت،Sand :درصد شن، Sgi:شاخص S دکستر، θs :رطوبت اشباع، PWP : رطوبت در نقطه پژمردگی، PAW: آب قابل استفاده، BD:جرم‌مخصوص‌ظاهری، SI: شاخص پایداری ساختمان، COLE: ضریب انبساط خطی، E_I: انرژی انتگرالی، Ks: هدایت هیدرولیکی اشباع، d_{mean}:میانگین قطر منافذ

جدول ۶- شاخص اشتراک و ارزش وزنی هر یک از شاخص‌های کیفیت خاک در روش TDS و MDS

شاخص	TDS		MDS		شاخص	TDS		MDS	
	COM	وزن	COM	وزن		COM	وزن	COM	وزن
pH	۰/۶۰۵	۰/۰۵۵	۰/۵۹۵	۰/۱۹	PWP	۰/۷۲۱	۰/۰۶۶		
AP	۰/۴۵۱	۰/۰۴۱			PAW	۰/۷۸۱	۰/۰۷۱		
TN	۰/۹۰۳	۰/۰۸۲	۰/۷۴۰	۰/۲۴	BD	۰/۸۹۰	۰/۰۸۱		
OC	۰/۸۸۳	۰/۰۸۰			COLE	۰/۹۶۸	۰/۰۸۸		
AZn	۰/۳۰۳	۰/۰۲۸			E_I	۰/۹۲۷	۰/۰۸۴	۰/۲۲۱	۰/۰۷
CEC	۰/۵۵۱	۰/۰۵۰			sθ	۰/۸۴۷	۰/۰۷۷	۰/۸۷۴	۰/۲۸
Clay	۰/۸۵۷	۰/۰۷۸	۰/۶۹۵	۰/۲۲	Ks	۰/۵۷۹	۰/۰۵۳		

COM: شاخص اشتراک

جرم‌مخصوص ظاهری و pH در گروه "بهینه بهتر است" (تلفیقی از معادلات ۱ و ۲). زیرا مناسب‌ترین pH خاک برای عناصرغذایی ۶ تا ۷ است و در مقادیر کمتر یا بیشتر از آن از قابلیت عناصرغذایی کاسته می‌شود. BD در خاک‌های شالیزاری دارای حدود بهینه است. زیرا این ویژگی بر رطوبت، درجه حرارت، تحرک‌پذیری عناصرغذایی تاثیر دارد(Liu *et al*, 2014). انرژی انتگرالی در گروه "کمتر بهتر است" (معادله ۲) قرار می‌گیرد زیرا زیاد بودن این ویژگی نشان از بالا بودن انرژی نیازمند برای جذب یک کیلوگرم از آب مصرفی است، از این رو می‌تواند بر رشد برنج تاثیر منفی داشته باشد. بسیاری از این نوع گروه‌بندی ویژگیها با دیدگاه‌های Andrews *et al*. (2004) هم راستا است. شاخص اشتراک و وزن ویژگیهای بررسی شده در TDS و MDS در جدول شش نشان داده شد. بیشتر ویژگی‌هایی که برای MDS انتخاب شده‌اند نسبت به TDS دارای وزن‌های بیشتری هستند. متفاوت بودن وزن ویژگی‌های یکسان در دو روش TDS و MDS در پژوهش Li *et al*. (2018) و Zhou *et al*. (2014) نیز گزارش شده است.

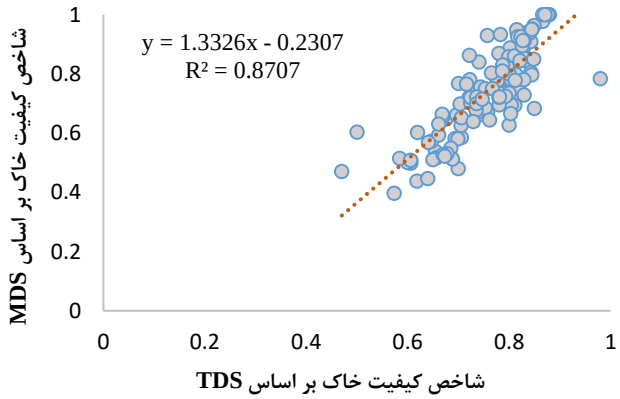
نتایج SQI در سه کلاس عملکرد به دو روش MDS و TDS در جدول هفت نشان داده شد. در TDS و بر پایه مقادیر SQI به دست آمده ، خاکهای منطقه مطالعه شده به این ترتیب قرار می‌گیرند: کلاس سوم>کلاس دوم>کلاس اول. همین ترتیب در روش MDS نیز مشاهده شد. به نظر می‌رسد بیشتر خاک‌های منطقه با کیفیت خاک بالا از توان تولید محصول زیادی نسبت به خاک‌هایی با کیفیت پایین‌تر برخوردار هستند. چنین شناختی از کیفیت خاک منطقه افزون بر اینکه برای بهره‌برداران قابل درک است، تصمیم سازی مدیریت نهاده‌ها و آبیاری را آسان‌تر می‌کند.

همبستگی بین نتایج SQI با کمک دو روش TDS و MDS در شکل (۲) نشان داده شد. با توجه به همبستگی مثبت و قوی بین این دو روش به نظر می‌رسد MDS با تعداد داده و ویژگی کمتر توانسته با TDS هم‌گرا باشد. میانگین SQI برای کلاس‌های مختلف عملکردی در TDS و MDS اختلاف معنی‌داری نشان دادند (جدول ۷). اما این تفاوت در TDS نسبت به MDS بیشتر بود. به نظر می‌رسد توانایی MDS با پنج ویژگی منتخب در تعیین کیفیت خاک‌های با عملکرد متوسط تا زیاد کمتر است. Askari and Holden (2014) بیان نمودند با استفاده از TDS برای توسعه SQI می‌توان نتایج جامع و کاملتری نسبت به روش MDS به دست می‌آید. کاهش تعداد ویژگی‌ها در MDS هرچند به اندازه کافی اطلاعات لازم برای تعیین کیفیت خاک بدست می‌آید Qi *et al*., 2009 ;) (Andrews *et al*. 2002a، اما ممکن است با کاهش تعداد ویژگیها دقت و حساسیت ارزیابی کیفیت خاک نیز کاهش یابد، زیرا کیفیت خاک و عملکرد گیاه زیر اثر مجموعه زیادی ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک است که حذف برخی از این ویژگی‌ها به معنی از دست دادن اطلاعاتی موثر در کیفیت خاک است (Qi *et al*., 2009). از طرفی همبستگی بین عملکرد گیاه برنج و شاخص تعیین کیفیت خاک در TDS نسبت به MDS بیشتر بوده (شکل ۳) که این خود می‌تواند نشان‌دهنده‌ی دقت و کارایی بیشتر TDS نسبت به MDS باشد. در TDS افزون بر ویژگی‌های مرتبط با حاصلخیزی و تغذیه گیاه، ویژگی‌های مرتبط با بهره‌وری خاک و نگهداری و انتقال آب در مجموعه داده‌ها قرار گرفتند که به نظر می رسد می‌توانند بر عملکرد گیاه موثر باشند.

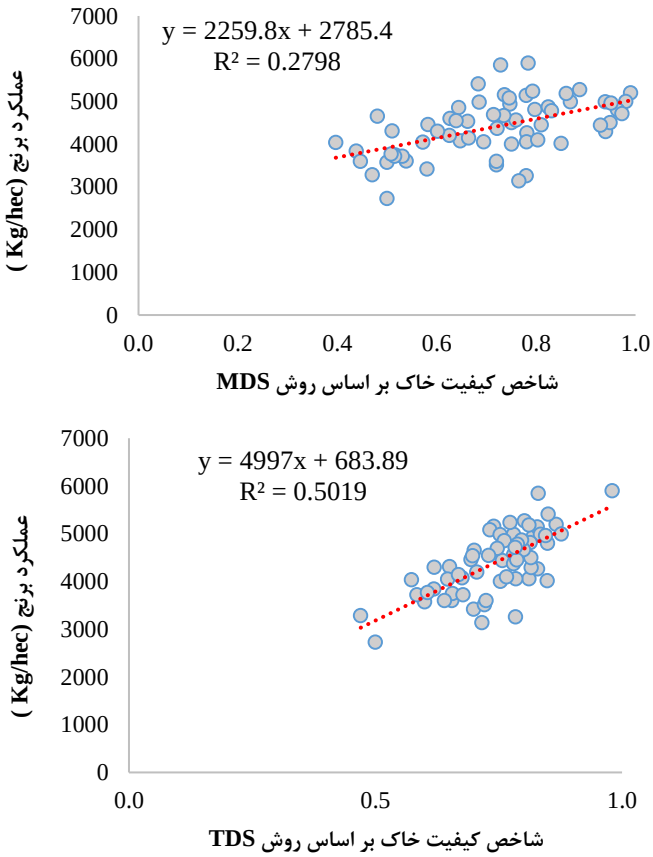
جدول ۷- میانگین شاخص کیفیت خاک برای کلاس یک، کلاس دو و کلاس سوم برپایه دو روش TDS و MDS

شاخص کیفیت خاک	کلاس یک (<۴۰۰۰ Kg hec^{-1})		کلاس دوم (۴۰۰۰-۴۵۰۰ Kg hec^{-1})		کلاس سوم (>۴۵۰۰ Kg hec^{-1})	
	میانگین ± انحراف معیار	دامنه	میانگین ± انحراف معیار	دامنه	میانگین ± انحراف معیار	دامنه
TDS	۰/۶۵±۰/۰۸a	۰/۴۷-۰/۷۸	۰/۷۴±۰/۰۸b	۰/۵۷-۰/۸۵	۰/۸۱±۰/۰۶c	۰/۷۰-۰/۹۸
MDS	۰/۵۹±۰/۱۲a	۰/۴۰-۰/۷۶	۰/۷۲±۰/۱۵b	۰/۴۴-۰/۹۸	۰/۷۹±۰/۱۲b	۰/۴۸-۰/۹۹

عوامل محدودکننده در عملکردهای پایین (در هر دو روشMDS و TDS) در مرحله اول فسفر قابل‌استفاده و با شدت کمتر کربن‌آلی و نیتروژن کل می‌باشد. در کلاس پایین عملکرد و کیفیت خاک، فسفر عامل اصلی محدود کننده می‌باشد، اما با افزایش کیفیت خاک و به دنبال آن عملکرد محصول، با کم شدن محدودیت فسفر و افزایش میانگین آن (جدول۱)، عامل محدودکننده در بخش حاصلخیزی خاک جبران می‌گردد. بنابراین رفع عامل محدودکننده در منطقه بررسی شده تا حد زیادی به بخش مدیریت کشاورزان منطقه برمی‌گردد. مدیریت مناسب خاک کلید اجرای کشاورزی دقیق و مدیریت پایداری خاک است و با رعایت آن در زمان مناسب می‌توان به تولید پایدار اقتصادی گیاه برنج در اراضی شالیزاری امید داشت.



شکل۲- همبستگی شاخص کیفیت خاک بین روش‌های MDS و TDS



شکل۳- همبستگی بین شاخص کیفیت خاک و عملکرد برنج با استفاده از روش‌های TDS و MDS

نتیجه‌گیری

رابطه بین عملکرد گیاه و خاک بسیار پیچیده است، اما عملکرد می‌تواند به عنوان معیاری برای ارزیابی خاک و کیفیت آن مورد استفاده قرار گیرد. در مطالعه حاضر اثرات کیفیت خاک بر عملکرد برنج مورد بررسی قرار گرفت. ویژگی‌هایی شیمیایی و حاصلخیزی (مانند pH، ظرفیت تبادل کاتیونی، نیتروژن کل، فسفر، پتاسیم و روی قابل استفاده) و ویژگی‌های فیزیکی (مانند مقدار رس، مقدار رطوبت قابل دسترس، انرژی انتگرالی، میانگین قطر منافذ، ضریب انبساط خطی) که بر کیفیت خاک اثرات زیادی دارند به‌عنوان ویژگی‌های ورودی برای دو روش تعیین شاخص کیفیت خاک (TDS و MDS) انتخاب شد. همبستگی مثبت و بالا در تعیین شاخص کیفیت خاک در هر دو روش TDS و MDS دیده می‌شود. از سوی دیگر در هر دو روش شاخص کیفیت خاک در مناطقی که عملکرد بیش از ۴۵۰۰ کیلوگرم دارند، بالاتر از دو کلاس دیگر بوده و در کلاس عملکردی ۴۵۰۰ تا ۴۰۰۰ کیلوگرم بر هکتار بیش از خاک‌هایی با عملکرد کمتر از ۴۰۰۰ کیلوگرم بر هکتار است. اختلاف شاخص کیفیت خاک در روش TDS در بین سه کلاس عملکردی معنی‌دار بوده، در حالی‌که اختلاف این شاخص در روش MDS تنها در کلاس عملکردی پایین (کمتر از ۴۰۰۰ کیلوگرم) با دو کلاس دوم و سوم معنی‌دار بوده و این روش نتوانست در عملکردهای بالاتر این اختلاف را نشان دهد. بنابراین با کاهش تعداد شاخص‌ها در روش MDS نسبت به روش TDS دقت و حساسیت ارزیابی کیفیت خاک کاهش یافته است.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCE

Andrews, S.S., and Carroll, C.R. (2001). Designing a Soil Quality Assessment Tool for Sustainable Agroecosystem Management. Ecological Applications, 11: 1573–1585.

Andrews, S.S., Karlen, D.L., and Cambardella, C.A. (2004). The soil management assessment framework: A quantitative soil quality evaluation method. Soil Science Society of America Journal. 68:1945–1962.

Andrews, S.S., Karlen, D.L., and Mitchell, J.P. (2002). A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems. Agriculture, Ecosystems and Environment, 40: 25–45.

Armenise, E., Redmile-Gordon, M. A., Stellacci, A. M., Ciccarese, A., and Rubino, P. (2013). Developing a soil quality index to compare soil fitness for agricultural use under different managements in the Mediterranean environment. Soil and Tillage

Research, 130:91-98.

Askari, M.S., and Holden, N.M. (2014). Indices for quantitative evaluation of soil quality under grassland management. Geoderma, 230: 131–142.

Bartlett, M. S. (1954). A note on the multiplying factors for various chi square approximations. Journal of the Royal Statistical Society, 16: 296–298.

Bergamin, A.C., Vitorino, A.C.T., Souza, F.R., Venturoso, L. R.V., Bergamin, L.P.P., and Campos, M.C.C. (2015). Relationship of soil physical quality parameters and maize yield in a Brazilian Oxisol. Chilean journal of agricultural research, 75(3): 357-365.

Biswas, S., Hazra, G.C., Purakayastha, T.J., Saha, N., Mitran, T., Roy, S.S., Basak, N., and Mandal B. (2017). Establishment of critical limits of indicators and indices of soil quality in rice-rice cropping systems under different soil orders. Geoderma, 292: 34-48.

Blake, G.R., and Hartge, K.H. (1986). Bulk density. In: Klute, A., Ed., Methods of Soil Analysis, Part 1—Physical and Mineralogical Methods, 2nd Edition, Agronomy Monograph 9, American Society of Agronomy—Soil Science Society of America, Madison, 363-382.

Booltink, H.W.G., Buma, J. (2002). Steady flow soil column method. In: Dane, J.H., Clake G.C. (Eds.), Methods of soil analysis. Part 4. Physical Methods. SSSA, Madison, WI, USA, pp. 812–814.

Bouman, B.A.M., Xiaoguang, Y., Huaqi, W., Zhimin, W., Junfang, Z., and Bin, C. (2006). Performance of aerobic rice varieties under irrigated conditions in North China. Field Crop Research. 97:53-65.

Brady, N.C., and Weil, R.R. (2008). Nature and properties of soils. 14th ed. prentice hall, Upper saddle Riever, NJ. USA, 992p.

Brejda, J.J., Moorman, T.B., Karlen, D.L.,and Dao, T.H. (2000). Identification of regional soil quality factors and indicators. Central and Southern High Plains. Soil Science Society of America Journal, 64:2115–2124.

Bremner, J. M., and Mulvaney, C. S. (1982). Totalnitrogen. In: A. L. Page (Ed.) *Methods of SoilAnalysis*. P Part 2: Chemical and microbiologicalproperties (2th Ed.). Agron. (No.2). pp.95-624. Madison, Wisconsin, USA: Soil Science Society of America.

Cechin, I. (1997). Comparison of growth and gas exchange in two hybrids of sorghum in relation to nitrogen supply. Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal, 9: 151-156.

Chen, Y.D., Wang, H.Y., Zhou, J.M., Xing, L., Zhu, B.S., Zhao, Y.C., and Chen, X.Q. (2013). Minimum data set for assessing soil quality in farmland of northeast China. Pedosphere, 23: 564–576.

Cheng, J. Ding, C., Li, X., Zhang, T., and Wang, X. (2016). Soil quality evaluation for navel orange production systems in central subtropical China. Soil & Tillage Research, 155: 225–232.

Dane, J. M., and Hopmans, J. W. (2002). Pressure plate extractor. In Dane, J. M and Topp, G. C. (Eds.). Methods of soil analysis. Part 4. Physical Method (pp. 688- 690). Madison, Wisconsin, USA: Soil Science Society of America.

Deng, Y., Cai, C., Xia, D., Ding, S., Chen, J., Wang, T. (2017). Soil Atterberg limits of different weathering profiles of the collapsing gullies in the hilly granitic region of southern China. Solid Earth, 8:499–513.

Dexter, A.R. (2004). Soil physical quality Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. Geoderma, 120:201-214.

Doberman, A., and Fairhurst, T. H. (2000). Rice: Nutrient disorders & nutrient management. International Rice Research Institute, Philippines.

Doran, J.W., and Parkin, B.T. (1994). Defining and assessing soil quality. In: Doran, J.W., Coleman, D.C., Bezdicek, D.F., Stewart, B.A. (Eds.), Defining Soil Quality for a Sustainable Environment. Soil Science Society of America, Inc., Madison, WI, USA, Special Publication, 35: 3-21.

Drury, C.F., Zhang, T.Q., Kay, B.D. (2003). The non-limiting and least limiting water range for soil nitrogen mineralization. Soil Science Society of America Journal, v.67, p.1388-1404.

Fan, T., Xu, M., Song, S., Zhou, G., and Ding, L. (2008). Trends in grain yields and soil organic C in a long-term fertilization experiment in the China Loess Plateau. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 171(3): 448-457.

Gardner, W.H. (1986).Water content. In Klute, A. (Eds.), Methods of soil analysis. Part 1. 2nd Ed. Agron. Monogr. No. 9, (pp. 493-541). Madison, Wisconsin, USA: American Society of Agronomy and Soil Science Society of America.

Gebhardt, S., Fleige, H., Horn, R. (2012). Anisotropic shrinkage of mineral and organic soils and its impact on soil hydraulic properties. Soil and tillage research, 125:96–104.

Gee, G. W., and OR, D. (2002). Particle- Size analysis. In Dane, J. H and Clake, G. C. (Eds.). Methods of soil analysis. Part 4. Physical Methods, No. 5, (pp. 255- 294). Madison, Wisconsin, USA: Soil Science Society of America.

Govaerts, B., Sayreb, K.D., Deckersa, J. (2006). A minimum data set for soil quality assessment of wheat and corn cropping in the highlands of Mexico. Soil and tillage Research. 87, 163–174.

Hair, J. F., Black, B., Babin, B., Anderson, R. E., and Tatham, R. L. (2006). Multivariate data analysis (6th ed.). New Jersy: Prentice Hall.

Kaiser, H. (1974). An index of factorial simplicity. Psychometrika, 39, 31–36.

Klingebiel, A.A., Montgomery, P.H. (1961). Land capability classification. In USDA Handbook; United States Department of Agriculture: Washington, DC, USA, Volume 210.

Kolawole, G.O., and Tian, G. (2007). Phosphorus fractionation and crop performance on an Alfisol

amended with phosphorus rock combined with and without plant residues. African Journal of Biotechology, 6(16):1972-1978.

Lan, M.Z., Lin, X.J., Wang, F., Zhang, H., and Chen, C.R. (2012). Phosphorus availability and rice grain yield in a paddy soil in response to long-term fertilization. Biology and Fertility of Soils, 48(5): 579-588.

Li, G. L., Chen, J., Sun, Z. Y., and Tan, M.Z. (2007). Establishing a minimum dataset for soil quality assessment based on soil properties and land-use changes. Acta Ecologica Sinica, 27:2715-2724.

Li, P., Zhang, T., Wang, X., and D. Yi. (2013). Development of biological soil quality indicator system for subtropical China. Soil & Tillage Research, 126: 112-118.

Liebig, M.A., Varvel, G., Doran, J.W. (2001). A simple performance based index for assessing multiple agroecosystem functions. Agron Journal, 93:313–318.

Lindsay, Willard L., and A. Norvell. 1978. Development of a DTPA Soil Test for Zinc, Iron, Manganese, and Copper 1. Soil science society of America journal, 42.3: 421-428.

Liu, Z. Wei, Z., Shen, J., Li, Sh., and Ai, C. (2014). Soil quality assessment of yellow clayey paddy soils with different productivity. Biology and Fertility of Soils, 50: 537-548.

Minasny, B., and McBratney, A.B. (2003). Integral energy as a measure of soil-water availability. Plant Soil, 249: 253-262.

Moebius, B.N., Van, E.s., H.M., Idowu, O.J., Schindelbeck, R.R. Kimetu, J.M., Ngoze, S., Lehmann, J., and Kinyangi, J.M. (2011). Long-term soil quality degradation along a cultivation Chronosequence in western Kenya. Agriculture, Ecosystems & Environment. Volume 141, Issues 1–2, Pages 86-99.

Nazarenko, S.M., Polchyna, V.A., Nikorych, and Грунтознавство: Підручник, in: Soil Science: Textbook, Higher Education, Kyiv, Ukraine, (2004), 400 (in Ukrainian). [9] N.A. Kaczynski, Physica Pochv. Chast 1, in: Soil Physics. Part 1, Higher School, Moscow, 1965, 324 (in Russian).

Nelson, D. W., and Sommers, L.E. (1996).Total carbon, organic carbon, and organic matter. Methods of soil analysis part 3: chemical methods: 961-1010.

Olsen, S. R., and Sommers, L. E. (1982). Phosphorus.In: A. L. Page (Ed.). Methods of soil analysis, Agron. (No. 9). (Part 2): Chemical and Microbiological Properties. (2th Ed.). (pp. 403-430).Am. Soc. Agron., Madison, WI, USA.

Ortega, R. A., and Santibanez, O. A. (2007). Determination of management zones in corn (Zea mays L.) based on soil fertility. Computer and Electronics in Agriculture, 58: 49- 59.

Painuli, D.K., Woodhead, T., and Pagliai, M. (1988). Effective use of energy and water in rice-soil puddling. *Soil and Tillage Research*. Volume 12(2): 149-161.

Pallant, J. (2005) SPSS survival manual: a step by step guide to data analysis using spss. Buckingham: Allen & unwin.

Pan, G., Smith, P., and Pan, W. (2009). The role of soil organic matter in maintaining the productivity and yield stability of cereals in China. Agriculture, Ecosystems & Environment, 129(1-3): 344-348.

Parker, JC, Amos, D.F., Kaster, D.L. (1977). Evaluation of several methods of estimating soil volume change. Soil science society of America journal, 41:1059–1064.

Pieri, C.J.M.G. (1992) Fertility of soils: A future for farming in the West African savannah. Springer series in physical Environment. Berlin, Germany.

Qi, Y., Darilek, J. L., Huang, B., Zhao, Y., Sun, W., and GU, Z. (2009). Evaluating soil quality indices in an agricultural region of Jiangsu Province, China. Geoderma, 149(3): 325-334.

Raiesi, F. (2017). A minimum data set and soil quality index to quantify the effect of land use conversion on soil quality and degradation in native rangelands of upland arid and semiarid regions. Ecological Indicators, 75:307–320.

Reynolds, W.D., Drury, C.F., Tan, C.S., Fox, C.A., and Yang, X.M. (2009). Use of indicators and pore volume function characteristics to quantify soil physical quality. Geoderma, 152:252-263.

Rezaei, S.A., Gilkes, R.J., and Andrews, S.S. (2006). A minimum data set for assessing soil quality in rangelands. Geoderma, 136: 229–234.

Sadusky, M. C., Sparks, D. L., Noll, M. R., and Hendricks, G. J. (1987). Kinetics and mechanisms ofpotassium release from sandy middle AtlanticCoastal plain soils. (pp.1460-1465). Soil Science Society of America Journa.

Seybold, C.A., Elrashidi, M.A., Engel, R.J. (2008). Linear regression models to estimate soil liquid limit and plasticity index from basic soil properties. Soil Science Society of America Journa, 173:25–34.

Sharma, S. (1996). Applied Multivariable techniques. John Wiley and Sons, New York.

Sheidai, E., Sepehry, A., Barani, H., Motamedi, J. and Shahbz, F. (2019). Establishing a Suitable Soil Quality Index for Semi-arid Rangeland Ecosystems in Northwest of Iran. Journal of Soil Science and Plant Nutrition. https://Doi.org/10.1007/s42729-019-00065-4

Silva, A.P., Kay, B.D. (1996). The sensitivity of shoot growth of corn to the least limiting water range of soils. Plant and Soil, v.184, p.323-329.

Skopp, J., Jawson, M.D., Doran, J.W. (1990). Steady-state aerobic microbial activity as a function of soil water content. Soil Science Society of America Journa, 54:1619– 1625.

Smaling, E.M.A., Braun, A.R. (1996).Soil fertility research in Sub-Saharan Africa: New dimension new challenges. Commun. Soil Science and Plan, 3(4): 365–386.

Sumner, M. E., and Miller, W. P. (1996). Cation exchange capacity and exchange coefficients. Methods of Soil Analysis Part 3-Chemical Methods, (methodsofsoilan3). (Pp.1201-1229).

Sun, B., Zhou, S., and Zhao, Q. (2003). Evaluation of spatial and temporal changes of soil quality based on geostatistical analysis in the hill region of subtropical China. Geoderma, 115(1), 85-99.

Tesfahunegn, G.B. (2014). Soil quality assessment strategies for evaluating soil degradation in Northern Ethiopia. https://Doi.org/10.1155/2014/646502.

Thomas, G. W. (1996). Soil pH and soil acidity. Methods of soil analysis Part 3-Chemical Methods, pp.475-490.

Torabi Golsefidi, H. (2001). Genesis, Classification and land suitability evaluation of wetland soils for irrigated rice in eastern Guilan province [Ph.D. Dissertation]. Iran: Isfahan University of Technology.

Veihmeyer, F.J., and Hendrickson, A.H. (1931). The moisture equivalent as a measure of the field capacity of soils. Soil Science Journal, 32: 181–193.

Warkentin, B.P., and H.F., Fletcher. 1977. Soil quality for intensive agriculture. Proc Int SEM on Soil Environ and Fert Manage in Intensive Agric Soc Sci Soil and Manure. Natl Inst of Agric Sci, Tokyo, pp. 594–598.

Wolf, B., and Snyder, G.H. (2003). Sustainable soils: the place of organic matter in sustainable soils and their productivity. New York (NY): Food Products Press.